

京都大学大学院 学生員 竹東 正孝
 京都大学工学部 正員 中川 博次
 京都大学工学部 正員 辻本 哲郎

本研究は非定常移動床流についての基礎的研究の一環として行われたもので、著者はこれまで「次の事項について」に検討している。1) 微小変動流量を対象とし、流量変化に対する河床スケーの単位応答の概念を用いて、線型解析を行い、非定常移動床流の遷移機構を検討した。但し、洪水等と対象とすると、線型解析は不適当で、河床スケーの単位応答(指数関数表示)も形式的なものであった。2) 流量急増・漸増実験により、流量増加時の河床の変形速度について検討し、はたして、追いつきモデルで表わし得ることを示し、変形速度とその時刻の流量とスケールで決まることから、河床の変形過程を逐次計算で予知し得ることを示した。但し、追いつきモデルでは、河床スケーが漸近的に平衡値に収束しない場合の精度良い予知が必ずしも可能でなかったこと、流量減少時についての検討がなされなかった等の反省点も挙げられる。

上述の理由と反省点に鑑み、今回は図1に示すような流量変化パターンでの実験を行った。実験は長さ9m幅33cmの可変勾配水路を河床勾配 $I=0.002$ に調整(通水中立)し、図1実験で対象とした流量変化パターン

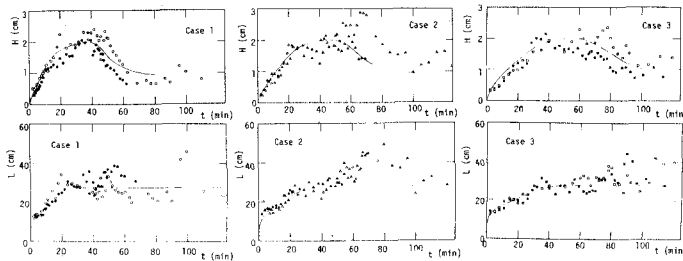
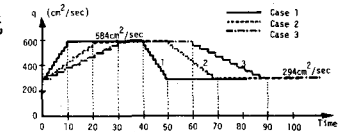


図2 河床の長さ・高さの時間的変化

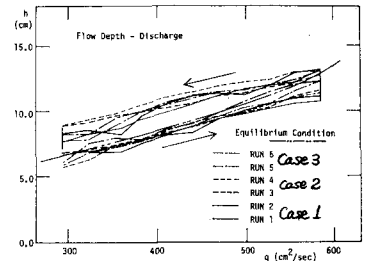


図3 水深～流量関係(実験値)

中央粒径0.07cmのほぼ均石を用いて行われた。河床縦断形状の時間的変化は自走式超音波測深器でとられ、crest-to-crestと定義した長さ・高さの平均値の時間的変化を調べた。河床スケー(長さ・高さ)についての実験結果は図2に示す通りで、床高は流量の増減に瞬時に応答はしないまでも、結構追いついているのに対し、床長は流量減少に伴った減少を呈すがCase 2ではむしろ増加の傾向が見られる。いずれにせよ、このように状況にある水深～流量関係は図3に示すように顕著なループを示している。

さて、河床スケーの時間的変化においては、とくに流量減少時が複雑で、この時期において crest-to-crest による長さ・高さの定義は zero-crossing 法を含め必ずしも適切でない。そこで主として抵抗に最も影響すると考えられる大流量時に形成されたものの残存河床(新しく発生したものはスケールも小さく局所的)に着目し、その個々のスケールの変化を調べたものが図4であり、流量減少時には長さ変化(追いつき条件が必要)はほとんど無く、高さ変化(埋めだし現象)が卓越するものと判断される。

ところで、今回の実験結果及びこれまでの実験結果より、流量が

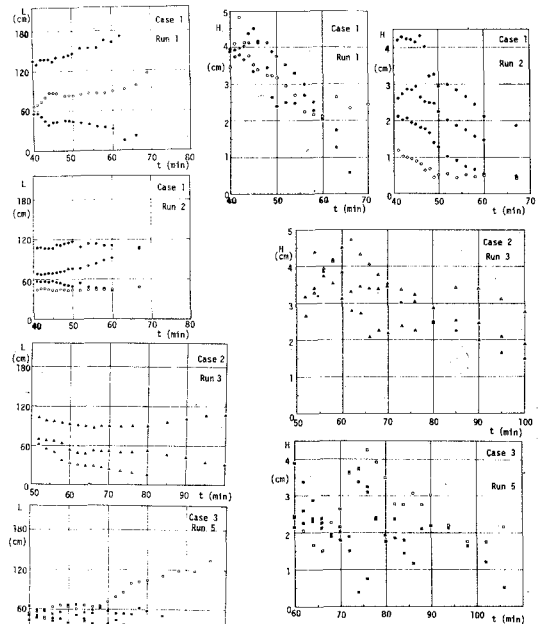


図4 流量減少期における個々の河床の挙動

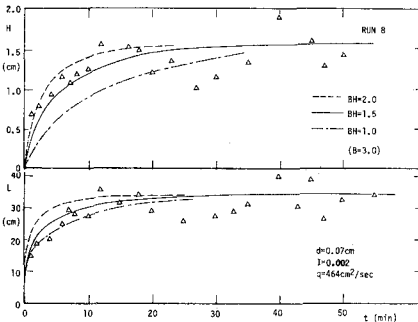


図5 平均河床からの河床状の発達 (流量一定)

変化する場合の移動床系の応答性状については河床波スケール Π の変化率 $d\Pi/dt = \text{func}(\Pi, \Pi_e, B\delta)$ [Π : 波高, 水深は平衡値を基準とする]の推定が最も重要である。流量増加時については、これまでの河床波の発達過程についての実験及び今回更に追加して行った数例(図5参照)をもとに、着目先のモデルを Π に平衡値への漸近的収束を考慮し次のように修正した。

$$\frac{dH}{dt} = \frac{B\delta}{1 - \beta_0 f_0(\delta)} \beta_0 \frac{1}{L_0} (1 - H_e), \quad \frac{dL}{dt} = \frac{B\delta}{1 - \beta_0 f_0(\delta)} \beta_0 \frac{1}{L_0} (1 - \frac{L}{L_0})$$

但し、 BH , BL , B は実験定数、 β_0 : 砂の空隙率、 L_0 : 初期波長であり $f_0(\delta)$ は定数とみてよい(詳しくは文献3を参照)。多くの実験結果を参考に流量増加時については $BH=BL=1.5$, $B=3.0$ が適合することがわかった。一方流量減少時は波高が一定の値に収束するから $BH=3.0$, $BL=0$ としてこの場合も上式を適用することとした。さて、河床波のスケールが水深と砂粒径に依存することから明らかで図6に示すように河床波高に流量の1/4に比例して水深・流量の1/4の関数として表わされていることがわかる。河床形状も既知量とする仮定則は例として Yalin によつて与えられた次式がある。

$$C/\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{U_{*c}}{U_*} \right) / \sqrt{1 - \beta_0} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{U_{*c}}{U_*} \right) \right] \quad [C: \text{Clayey 係数}]$$

中: 砂質土質角] これに $U_* = C/\eta$, $\beta_0 = U_{*c}/U_{*c}$ を代入して実験河床波スケールを代入して C/η を数値計算で求めると図6の破線のように水深・流量関係が求められる。但し図6に示す水深の実験値とは水路側壁の初深を初深と経深で採用している。一方、流砂量については河床波の所生にかかわらず $sluam\ power$ (ハ工) と対する関係がある(河床材料走)より、このタイプの流砂量式を用いた。即ち $I = \text{const.}$ かつ $\beta_0 = \text{func}(\beta)$ である。(河床波の銅線過程におけるこの型式の流砂量の適用性は確認されていない)。また平衡状態の河床波のスケールについても同様の考えから H_e , L_e も β の関数と考え、これは実験的に決めた(図7)。

図7中に実験式を示したが $\beta = 55 \text{ cm}^2/\text{sec}$ は今回の実験対象 ($d=0.07 \text{ cm}$, $I=1/500$) に対する限界値流力に対応させている。以上述べたモデルを用いて、今回の実験条件を想定して計算すると、図2中の実験や図8, 9に示すように(図9は図3と比較参照される)、現象が結構よく説明される。さらに $\beta = 450 \text{ H}^{1.5} \sin(2\pi t/T_p)$ [単位 cm^2/sec] なる変動流量については $t=0$; $H=0$ $L=L_0$ を初期条件として計算した結果を図10に示す。

今後、より一般的な理論へと進展させたい。

参考文献: 1) 竹中川・江本: 第36回年報, 2) 中川・江本: 第25回年報, 3) 中川・江本: 第25回年報 (1976)
4) Yalin: La Houille Blanche (1964)

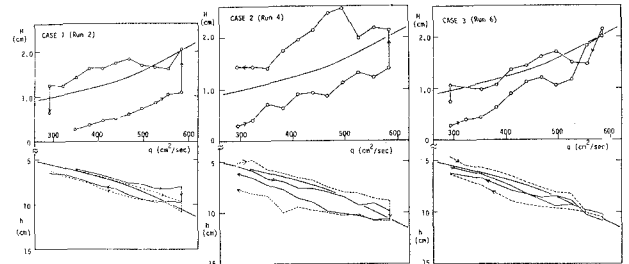


図6 河床波の波高変化と水深の変化の対応 (図中、実験値: 実線、破線: Yalinの式による計算値)

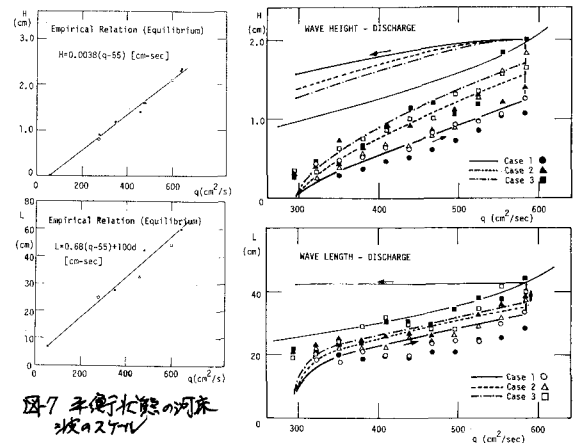


図7 平衡状態の河床波のスケール

図8 河床波のスケール・流量の関係

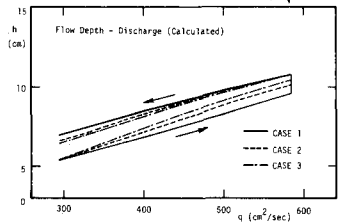


図9 水深・流量関係 (理論値)

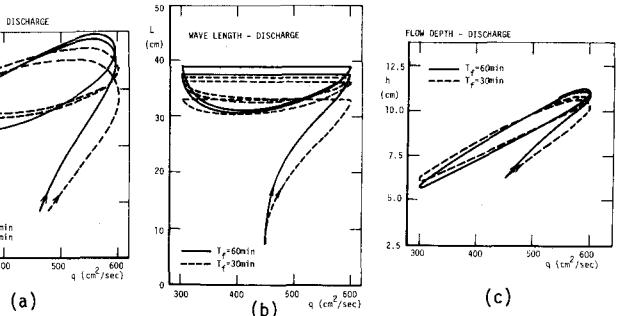


図10 正弦波状流量変化に対する河床波のスケール・水深の応答性